

dr hab. inż. Elżbieta Horszcharuk*
mgr inż. Piotr Brzozowski*

Wpływ przygotowania podłoża betonowego na przyczepność betonów naprawczych układanych pod wodą

Influence of surface preparation on adhesion of underwater concrete repair

Remonty i naprawy betonowych konstrukcji hydrotechnicznych należą do jednych z bardziej skomplikowanych prac budowlanych z uwagi na rodzaje oddziaływań zewnętrznych oraz specyfikę konstrukcji obiektów hydrotechnicznych. Dynamiczny rozwój technologii betonu spowodował, że w przypadku remontu obiektów hydrotechnicznych wymagających zastosowania okładzin żelbetonowych coraz częściej wykorzystuje się betony układane pod wodą [11, 12] w warunkach oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego. Jest to zagadnienie złożone i wymaga zastosowania specjalnej aparatury badawczej.

Metody naprawy obiektów hydrotechnicznych w ujęciu serii norm PN-EN 1504

Zagadnienia naprawy i ochrony konstrukcji betonowych zawarto w serii norm PN-EN 1504 pod ogólnym tytułem *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji z betonu*. Ogólne zasady stosowania materiałów i systemów do napraw i ochrony betonu przedstawiono w normie PN-EN 1504-9 [14]. Większość napraw opisanych w tej normie wykonuje się po wyłączeniu obiektu z eksploatacji (bez kontaktu elementów konstrukcji z wodą), nakładając zaprawę lub beton naprawczy.

W przypadku zastosowania betonów podwodnych możliwe jest wykonywanie prac naprawczych w bezpośrednim kontakcie naprawianego elementu z wodą, co pozwala na przeprowadzanie prac remontowych bez wyłączenia obiektu lub częściowego ograniczenia pracy obiektu.

Podstawową operacją technologiczną naprawy związanej z układaniem betonu naprawczego, warunkującą jej skuteczność, jest właściwe przygotowanie podłoża betonowego. Zgodnie z PN-EN 1504-10

[15] jest to proces zapewniający spełnienie podstawowego wymagania, jakim jest *osiągnięcie wymaganego stanu podłoża w zakresie czystości, szorstkości, zarysowania, wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie, zanieczyszczenia chlorkami lub innymi szkodliwymi substancjami i głębokości ich wnikięcia, głębokości karbonatyzacji, zawilgocenia, temperatury i stopnia skorodowania zbrojenia*.

W przypadku naprawy konstrukcji betonowych wykonywanych techniką betonowania podwodnego najczęściej stosuje się mechaniczną metodę przygotowania podłoża przez młotkowanie ręczne lub mechaniczne. Zastosowanie metod oczyszczania strumieniem wody pod ciśnieniem do konstrukcji podwodnych wymaga specjalistycznego sprzętu. W Polsce, z uwagi na niewielką liczbę napraw wykonywanych z zastosowaniem betonów podwodnych, metoda ta nie jest stosowana.

Przyczepność przy odrywaniu jako miara jakości zespolenia w układach naprawczych

Skuteczność i trwałość naprawy zależy od odpowiedniego doboru układu naprawczego [4], który powinien zapewnić dobrą współpracę wszystkich jego komponentów. Wynika z tego konieczność analizy wielko-wymiarowej przestrzeni dobrej współpracy w układzie naprawczym [3]. Lepsza jakość zespolenia i wynikające z niej zwiększenie przyczepności warstwy naprawczej do podłoża betonowego traktowane jest jako czynnik zwiększający tolerancję na pewną niekompatybilność układu naprawczego [2, 5]. **Zapewnienie właściwej jakości zespolenia jest podstawowym wymaganiem przy wykonywaniu naprawy.**

Jakość zespolenia jest utożsamiana bardzo często z adhezją różnych materiałów do siebie [1, 3]. Wyróżnia się adhezję związaną z oddziaływaniami chemicznymi i fizykochemicznymi (tzw. adhezja właściwa) oraz adhezję mechaniczną polegającą na

mechanicznym zakotwieniu materiału naprawczego w porach i nierównościach podłoża betonowego.

Poziom adhezji (właściwej i mechanicznej) w układach naprawczych jest kształtowany przez wiele czynników. Do najistotniejszych z nich należą [2, 3, 7]:

- wytrzymałość mechaniczna podłoża;
- stopień rozwinięcia powierzchni podłoża,
- właściwości fizyczne łączonych materiałów (lepkość, zwilżalność, skurcz wiązania, rozszerzalność cieplna, moduł sprężystości);
- niejednorodność materiałów (defekty wewnętrzne);
- mechanizmy transportu w obszarze warstwy przejściowej (dyfuzja, osmoza);
- fluktuacje temperatury wywołujące zmiany właściwości materiałów i powodujące powstawanie naprężeń w obszarze przejściowym pomiędzy warstwami;
- zjawiska związane z destrukcją materiałów, np. starzenie powłok naprawczych.

Dążenie do stworzenia warunków do uzyskania największej przyczepności między materiałem naprawczym a podłożem betonowym znajduje odzwierciedlenie w PN-EN 1504-10 [15] oraz wytycznych producentów systemów naprawczych. Do oceny przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie podłoża i oznaczania przyczepności materiału naprawczego PN-EN 1504-10 [15] zaleca tzw. badanie pull-off. W normie PN-EN 1542 [16] opisano pomiar przyczepności przez odrywanie wyrobów i systemów do napraw, nakładanych na znormalizowane próbki betonu, przygotowanego zgodnie z PN-EN 1766 [17]. Wynikiem badania metodą pull-off jest **przyczepność średnia** obliczona dla co najmniej trzech miarodajnych wyników badania przy standardowym zniszczeniu. Obok wartości przyczepności należy wizualnie ocenić typ zniszczenia: *A* – zniszczenie kohezyjne w podłożu betonowym; *A/B* – zniszczenie adhezyjne na powierzchni

* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

rozdziłu pomiędzy podkładem a materiałem naprawczym; *B* – zniszczenie kohezyjne w warstwie naprawczej. Właściwe oznaczenie adhezji otrzymuje się wtedy, gdy zniszczenie nastąpi na granicy materiałów (w złączu). W innych przypadkach wyznaczone naprężenie będzie opisywać siłę oporu adhezyjno-kohezyjnego lub w granicznym przypadku, gdy zniszczenie nastąpi w podłożu lub w warstwie naprawczej, siłę kohezji. Szczegółowe wymagania użytkowe dotyczące wyrobów do wykonywania napraw konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych zawarto w PN-EN 1504-3 [13]. Wymagania dotyczące wytrzymałości na ściskanie oraz przyczepności materiałów naprawczych do konstrukcji betonowych przedstawiono w tabeli.

Wymagania użytkowe dotyczące wyrobów do napraw w zakresie wytrzymałości na ściskanie i przyczepności na podstawie PN-EN 1504-3 [13]

Właściwość użytkowa	Metoda badania	Wymaganie			
		naprawa konstrukcyjna		naprawa niekonstrukcyjna	
		klasa R4	klasa R3	klasa R2	klasa R1
Wytrzymałość na ściskanie	EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
Przyczepność	EN 1542	≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	

Skład podwodnego betonu naprawczego i metodyka prowadzenia badań

Przy projektowaniu składu podwodnego betonu naprawczego wykorzystano zalecenia zawarte w wytycznych amerykańskich i niemieckich opisanych w pracy [10]. Ze względu na klasę ekspozycji (budowle stałe zanurzone w wodzie morskiej), założono klasę betonu C40/50. Do sporządzenia mieszanki użyto cementu portlandzkiego CEM I 42,5N – HSR/NA w ilości 429 kg oraz 171 litrów wody na 1 m³ mieszanki. Stos okruszowy kruszywa naturalnego ograniczono do frakcji żwiru o uziarnieniu do 8 mm, a ilość kruszywa wynosiła 1869 kg/m³ przy punkcie piaskowym na poziomie 40%. Ilość superplastyfikatora dobrano tak, aby rozpliw mieszanki po 2 h od zarobienia wynosił co najmniej 400 mm. Ilość domieszki stabilizującej do betonów podwodnych ustalono na poziomie 1% masy cementu.

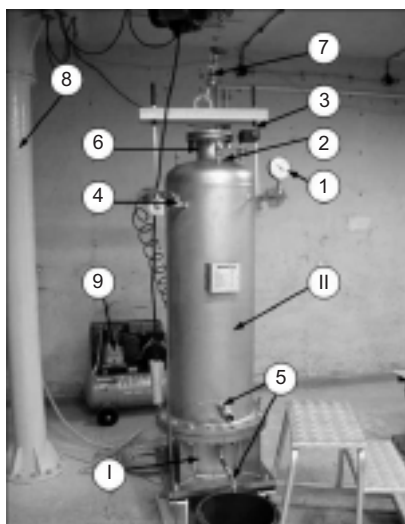
Badania przyczepności betonu naprawczego do podłoża betonowego wykonano na specjalnie przygotowanych podkładach w kształcie stożka ściętego, o górnej średnicy ok. 300 mm oraz wysokości 100 – 120 mm. Podkłady wykonane zostały z mieszanki o tym samym składzie co beton naprawczy i miały wiek od 3 miesięcy do roku. Przed nałożeniem warstwy naprawczej powierzchnie górne podkładów poddano dodatkowej ob-

róbce. Zastosowano trzy rodzaje obróbki powierzchniowej, możliwe do wykonania pod wodą:

- mycie niskociśnieniowe z użyciem lancy wodnej przy ciśnieniu 15 MPa;
- ręczne skuwanie młotem pneumatycznym na głębokość 1 – 2 cm;
- piaskowanie – głębokość obróbki ok. 1 cm.

W celu przeprowadzenia badań betonu w warunkach działania zmiennego ciśnienia hydrostatycznego zastosowano specjalnie skonstruowane stanowisko badawcze ze zbiornikiem ciśnieniowym (fotografia), którego opis konstrukcji znajduje się w pracy [9]. Podkłady umieszczono w formie w zbiorniku, napełniono go wodą, wylano warstwę betonu naprawczego grubości

3 – 5 cm, a następnie zadawano ciśnienie hydrostatyczne o wartości od 0,1 do 0,5 MPa. Biorąc pod uwagę wyniki wcześniejszych badań właściwości betonów podwodnych w warunkach oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego, okres dojrzewania betonów naprawczych w zbiorniku skrócono do 7 dni [8]. Po wyjęciu ze zbiornika elementy prób-



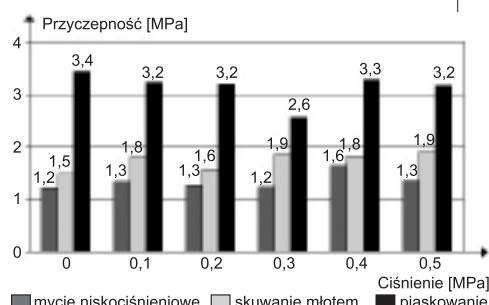
Stanowisko do badania betonów podwodnych w warunkach oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego: I – część dolna zbiornika; II – część górna zbiornika; 1 – manometr; 2 – zawór odpowietrzający; 3 – regulator ciśnienia; 4 – zawór przelewowy; 5 – zawory spustowe; 6 – rura załadownicza; 7 – hak wciągarki; 8 – żuraw; 9 – sprężarka

ne dojrzewały w wannie z wodą o temperaturze 20 ± 2 °C. Po 28 dniach od nałożenia warstwy naprawczej elementy próbne osuszono. Przed naklejeniem krążków do badań pull-off, powierzchnia górna elementu była wyrównywana przez szlifowanie. Liczba krążków naklejanych na warstwie naprawczej wynosiła każdorazowo 6 sztuk. Badania przyczepności wykonano za pomocą urządzenia DYNA 50 zgodnie z PN-EN 1542 [16]. Uzyskane wyniki badania przyczepności betonu naprawczego, dojrzewającego w warunkach oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego, porównano z elementami kontrolnymi wykonanymi z betonu naprawczego dojrzewającego w wannach z wodą pod ciśnieniem atmosferycznym.

Wyniki badań przyczepności

Wyniki przyczepności betonu naprawczego dojrzewającego w warunkach zmiennego ciśnienia hydrostatycznego, w zależności od sposobu przygotowania powierzchni, przedstawiono na rysunku 1. Najlepszą przyczepność, niezależnie od wartości ciśnienia działającego na beton, uzyskano w przypadku podkładów o powierzchni piaskowanej. Naprężenia odrywające są ponad dwukrotnie większe niż betonu naprawczego układanego na podkładach oczyszczanych przez mycie niskociśnieniowe oraz znacznie większe niż powierzchni skuwanej młotem. W przypadku mycia niskociśnieniowego oraz skuwania młotem zaobserwowano natomiast korzystny wpływ ciśnienia hydrostatycznego na przyczepność betonu naprawczego do podłoża. Dla powierzchni piaskowanych najwyższe wartości odnotowano w przypadku betonu kontrolnego niepoddanego oddziaływaniu ciśnienia hydrostatycznego.

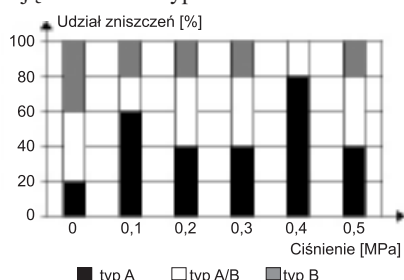
Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1504-3 [13] dotyczącymi przyczepności do podłoża i wytrzymałości na ściskanie materiałów konstrukcyjnych, w przypadku podłoża piaskowanego beton naprawczy można zaliczyć do klasy R4, powierzchni skuwanych młotem do klasy R3,



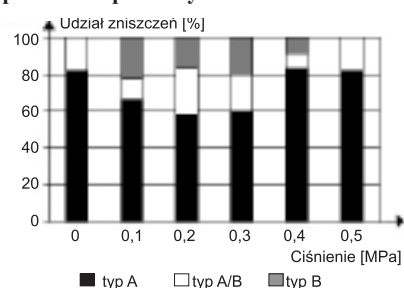
Rys. 1. Wyniki badań przyczepności podwodnych betonów naprawczych metodą pull-off

a powierzchni naprawczych oczyszczonych niskociśnieniową metodą hydrodynamiczną, tylko przy ciśnieniu hydrostatycznym 0,4 MPa, beton naprawczy można zakwalifikować do klasy R3. Z uwagi na wytrzymałość na ściskanie wszystkie betony naprawcze zaliczane są do klasy R4, gdyż po 28 dniach uzyskały wytrzymałość na ściskanie powyżej 50 MPa (klasa C40/50).

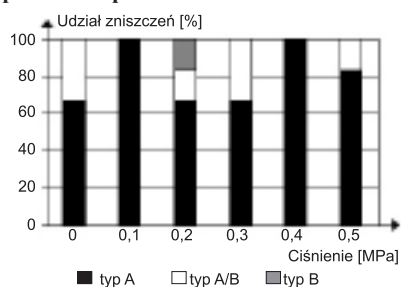
Na rysunkach 2 – 4 przedstawiono procentowy udział typów zniszczeń uzyskanych w badaniach przyczepności wg różnych metod przygotowania powierzchni podkładów. Wraz ze wzrostem działającego ciśnienia hydrostatycznego zwiększyła się liczba zniszczeń kohezyjnych w podkładzie (typ A). Szczególnie jest to widoczne przy ciśnieniu 0,4 MPa. Zniszczenia kohezyjne typu A dominują w przypadku skuwania młotem oraz piaskowania. W podkładach betonowych czyszczonych za pomocą mycia niskociśnieniowego przeważają zniszczenia typu A/B lub B.



Rys. 2. Procentowy udział typów zniszczeń w przypadku przygotowania powierzchni podkładów przez mycie niskociśnieniowe



Rys. 3. Procentowy udział typów zniszczeń w przypadku przygotowania powierzchni podkładów przez skuwanie młotem



Rys. 4. Procentowy udział typów zniszczeń w przypadku przygotowania powierzchni podkładów przez piaskowanie

Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły wpływ rodzaju zastosowanej obróbki powierzchniowej podłoża betonowego na przyczepność podwodnego betonu naprawczego. Przygotowanie podłoża betonowego metodą piaskowania zapewniło największą przyczepność i większy udział zerwań kohezyjnych w podłożu niż w przypadku powierzchni skuwanych młotem czy niskociśnieniowego czyszczenia hydrodynamicznego. Ta ostatnia metoda okazała się najmniej skuteczna. Przyczepność betonu naprawczego do tak przygotowanego podłoża była prawie dwukrotnie mniejsza niż betonów naprawczych układanych na podłożu piaskowanym. Ponadto zaobserwowano pozytywny wpływ wysokiego ciśnienia hydrostatycznego (powyżej 0,2 MPa) na przyczepność betonu naprawczego do podłoża, niezależnie od rodzaju zastosowanej obróbki powierzchniowej.

Publikacja została przygotowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy nr N N506 233139.

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań przyczepności podwodnych betonów naprawczych układanych na podłożu betonowym przygotowanym różnymi metodami. Badania przeprowadzono z użyciem specjalnego stanowiska badawczego umożliwiającego dojrzwanie betonów naprawczych w warunkach oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego. Zastosowano następujące rodzaje obróbki powierzchni betonu: mycie niskociśnieniowe, skuwanie młotem pneumatycznym i piaskowanie. Zaobserwowano wyraźny wpływ rodzaju obróbki powierzchniowej na przyczepność podwodnych betonów naprawczych do podłoża oraz na charakter zniszczenia podczas badania przyczepności metodą pull-off.

Abstract

The paper presents the results of a study of adhesion of underwater concrete repair arranged on concrete with different surface technology. Research was conducted using a special chamber for concrete repair under the impact of ripening of hydrostatic pressure. Uses the following types of surface treatment of concrete: low pressure pneumatic forging hammer and washing, sand-blasting. There was a pronounced effect of surface preparation on the adhesion of underwater concrete repair to the ground and the nature of the destruction during the test the adhesion pull-off method.

Literatura

- [1] Courard L.: Parametric study for the creation of the interface between concrete and repairs products, *Materials and Structures*, Vol. 33 /2000, p. 65 – 72.
- [2] Courard L., Garbacz A., Piotrowski T.: Effects of concrete surface quality on adhesion of repair mortars, CCC 2008 – Challenges for Civil Construction, Porto, Portugal, 2008.
- [3] Czarnecki L.: Adhesion – A challenge for concrete repair, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*. (Alexander et al eds.), Taylor&Francis Group, London 2009.
- [4] Czarnecki L., Emmons P.: Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Wyd. Polski Cement, Kraków, 2002.
- [5] Czarnecki L., Głodkowska W., Piątek Z.: Estimation of compatibility of polymer and polymer-cement composites with ordinary concrete under short-time load conditions, *Archives of Civil Engineering*, 1/2004, p. 133-150.
- [6] Czarnecki L., Łukowski P.: Naprawy i ochrona konstrukcji betonowych w świetle norm europejskich. *Budownictwo Technologie Architektura*, 4, 2008, 52-55.
- [7] Garbacz A., Górka M., Courard L.: On the effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 57/2005, p. 49–60.
- [8] Horszczaruk E., Brzozowski P., Adamczewski G.: Wpływ ciśnienia hydrostatycznego na rozwój wytrzymałości betonów cementowych układanych pod wodą. *Inżynieria i Budownictwo*, 5/2013, s. 263 – 266.
- [9] Horszczaruk E., Brzozowski P., Rudnicki T.: Urządzenie do badań betonów podwodnych w warunkach oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego, *Przegląd Budowlany*, nr 6/2012, s. 36 – 38.
- [10] Horszczaruk E., Łukowski P.: Betony podwodne – badania i dobór składu, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 5/2009, s. 274 – 278.
- [11] Kańka S.: Doświadczenia z betonowania fundamentu cylindrycznej wieży ujęcia wody z zastosowaniem betonu podwodnego, *Inżynieria i Budownictwo*, 10/2011, s. 519 – 522.
- [12] Kańka S., Sołtyś R.: Przykłady zastosowania technologii betonowania pod wodą w remontach budowli hydrotechnicznych. *Przegląd Budowlany*, 7 – 8/2010, s. 54 – 57.
- [13] PN-EN 1504-3:2006 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 3: Naprawy konstrukcyjne i niekonstrukcyjne.
- [14] PN-EN 1504-9:2010 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 9: Ogólne zasady dotyczące stosowania wyrobów i systemów.
- [15] PN-EN 1504-10:2005 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 10: Stosowanie wyrobów i systemów na placu budowy oraz sterowanie jakością prac.
- [16] PN-EN 1542:2000 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań – Pomiar przyczepności przez odrywanie.
- [17] PN-EN 1766:2001 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań – Betony wzorcowe do badań.